

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. Е. МИРОШНИКОВ, В. В. КОЛОДЯЖНЫЙ

РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ПРИЕМА СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ, ЕГО ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЕ

Разработана и внедрена подсистема приема, записи на промежуточной частоте и обработки сигнала, которая реализует предложенный способ корреляционной обработки сигнала некогерентного рассеяния и позволяет избавиться от недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки. Для дискретизации сигнала используются импульсы опроса с периодом следования, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина, частота которого равна промежуточной частоте приемника с точностью до доплеровского сдвига спектра сигнала рассеяния, вызванного движением ионосферной плазмы. Таким образом, соседние отсчеты сигнала находятся в квадратурной зависимости. Это позволяет определять ординаты квадратурных составляющих корреляционной функции принятого сигнала с временными сдвигами (аргументами), кратными периоду сигнала промежуточной частоты и оптимальными для конкретных условий. Предложено использовать для каждого дискретного аргумента корреляционной функции одну ординату в качестве косинусной и две ординаты, симметрично сдвинутые относительно нее на один период импульсов опроса, в качестве синусных составляющих. Это позволяет исключить смещение в определении скорости движения плазмы и повысить точность определения огибающей корреляционной функции, по которой оцениваются параметры ионосферы. Рассмотрены аппаратно-методические особенности подсистемы и обработки сигнала. Основными элементами подсистемы являются усилитель промежуточной частоты с возможностью бланкирования принимаемого сигнала во время зондирования, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь на базе модуля L-card E20-10, персональный компьютер и устройство формирования опросных импульсов аналого-цифрового преобразователя. Предложен оригинальный способ формирования импульсов опроса, основанный на выделении 4-й гармоники сигнала из последовательности импульсов с оптимальной скважностью. Приведена принципиальная схема разработанного устройства формирования опросных импульсов. Представлены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенного способа корреляционной обработки и разработанной подсистемы. Основные преимущества разработки: исключение аналоговых цепей для формирования квадратурных сигналов позволяет избежать возможного влияния ряда аппаратных факторов на точность определения квадратурных составляющих корреляционной функции сигнала; адаптация шага временного сдвига и количества ординат измеряемой корреляционной функции к некогерентно рассеянному сигналу при различном состоянии ионосферы позволяет уменьшить погрешности оценки корреляционной функции полезного сигнала и, следовательно, параметров ионосферы; запись большого количества отсчетов сигнала с малыми интервалами между ними позволяет дополнительно к корреляционному анализу использовать спектральную обработку, а также апробировать и использовать различные алгоритмы обработки, наиболее приемлемые для конкретных условий измерений; появляется возможность исключения помех на ранней стадии обработки, анализируя непосредственно отсчеты сигнала.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, некогерентно рассеянный сигнал, система обработки данных, корреляционная обработка, параметры ионосферы.

Л. Я. ЄМЕЛЬЯНОВ, А. Є. МИРОШНИКОВ, В. В. КОЛОДЯЖНИЙ

РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ПРИЙОМУ СИГНАЛУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ, ЙОГО ЗАПИСУ Й ОБРОБКИ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ

Розроблено та впроваджено підсистему прийому, запису на проміжній частоті і обробки сигналу, яка реалізує запропонований спосіб кореляційної обробки сигналу некогерентного розсіювання і дозволяє позбутися недоліків, властивих системам з фіксованим алгоритмом обробки. Для дискретизації сигналу використовуються імпульси опитування з періодом слідування, рівним чверті періоду сигналу синхронного гетеродина, частота якого дорівнює проміжній частоті приймача з точністю до доплерівського зсуву спектру сигналу розсіювання, що викликаний рухом іоносферної плазми. Таким чином, сусідні відліки сигналу знаходяться у квадратурній залежності. Це дозволяє визначати ординати квадратурних складових кореляційної функції прийнятого сигналу з часовими зсувами (аргументами), кратними періоду сигналу проміжної частоти і оптимальними для конкретних умов. Запропоновано використовувати для кожного дискретного аргументу кореляційної функції одну ординату як косинусну і дві ординати, симетрично зсунуті відносно неї на один період імпульсів опитування, як синусних складових. Це дозволяє виключити зміщення у визначенні швидкості руху плазми і підвищити точність визначення обвідної кореляційної функції, за якою оцінюються параметри іоносфери. Розглянуто апаратно-методичні особливості підсистеми та обробки сигналу. Основними елементами підсистеми є підсилювач проміжної частоти з можливістю бланкування сигналу під час зондування, швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач на базі модуля L-card E20-10, персональний комп'ютер і пристрій формування опитувальних імпульсів аналого-цифрового перетворювача. Запропоновано оригінальний спосіб формування імпульсів опитування, заснований на виділенні 4-й гармоніки сигналу з послідовності імпульсів з оптимальною скважністю. Наведено принципову схему розробленого пристрою формування опитувальних імпульсів. Представлені експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованого способу кореляційної обробки і розробленої підсистеми. Основні переваги розробки є такі: виключення аналогових ланцюгів для формування квадратурних сигналів дозволяє уникнути можливого впливу ряду апаратних факторів на точність визначення квадратурних складових кореляційної функції сигналу; адаптація кроку часового зсуву і кількості ординат вимірюваної кореляційної функції до сигналу некогерентного розсіювання при різному стані іоносфери дозволяє зменшити похибки оцінки кореляційної функції корисного сигналу і, отже, параметрів іоносфери; запис великої кількості відліків сигналу з малими інтервалами між ними дозволяє додатково до кореляційного аналізу використовувати спектральну обробку, а також апробувати і використовувати різні алгоритми обробки, що найбільш прийнятні для конкретних умов вимірювань; з'являється можливість виключення перешкод на ранній стадії обробки, аналізуючи безпосередньо відліки сигналу.

Ключові слова: радар некогерентного розсіювання, некогерентно розсіяний сигнал, система обробки даних, кореляційна обробка, параметри іоносфери.

DEVELOPMENT OF SUBSYSTEM FOR RECEPTION OF INCOHERENT SCATTER SIGNAL, ITS RECORDING AND PROCESSING AT THE INTERMEDIATE FREQUENCY

The subsystem of signal reception, recording at intermediate frequency and processing, which implements the proposed method of the incoherent scatter signal correlation processing and eliminates the shortcomings of systems with a fixed processing algorithm, has been developed and implemented. For sampling the signal, reading pulses are used with a repetition period equal to a quarter of the period of the synchronous heterodyne signal, whose frequency is equal to the intermediate frequency of the receiver up to the Doppler shift of the spectrum of the scattered signal caused by the movement of the ionospheric plasma. Thus, the adjacent signal samples are in quadrature dependence. This allows us to determine the ordinates of the quadrature components of the correlation function of a received signal with time shifts (arguments), multiple to the period of the intermediate frequency signal and optimal for specific conditions. For each discrete argument of the correlation function, we proposed to use one ordinate as a cosine and two ordinates, symmetrically shifted relative to it by one period of the reading pulses, as sine components. This allows us to eliminate the bias in estimating the plasma velocity and improve the accuracy of determining the correlation function envelope that is used to estimate the parameters of the ionosphere. The hardware and methodical features of the subsystem and signal processing are considered. The main elements of the subsystem are the intermediate frequency amplifier with the possibility of blanking the received signal during sounding, a high-speed analog-to-digital converter based on the L-card E20-10 module, a personal computer, and unit for shaping analog-to-digital converter reading pulses. An original method for generating reading pulses based on extracting the 4th harmonic of a signal from a sequence of pulses with an optimal relative pulse duration is proposed. A schematic diagram of the developed unit for shaping reading pulses is given. Experimental results confirming the effectiveness of the proposed correlation processing method and developed subsystem are presented. The main advantages of the development: exclusion of analog circuits for shaping quadrature signals allows us to avoid the possible influence of a number of instrumental factors on the accuracy in determination of the quadrature components of the signal correlation function; adapting the time shift step and the number of ordinates of the measured correlation function to the incoherently scattered signal at different states of the ionosphere reduces errors of estimation of the useful signal correlation functions and, therefore, the parameters of the ionosphere; recording a large number of signal samples with small intervals between them make it possible, in addition to correlation analysis, to use spectral processing, as well as test and use various processing algorithms that are most appropriate for specific measurement conditions; it is possible to eliminate interference at early stage of processing by analyzing the signal samples directly.

Keywords: incoherent scatter radar, incoherent scatter signal, data processing system, correlation processing, ionospheric parameters.

Введение. Для определения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) используются антенны с большими габаритами, мощные радиопередающие и чувствительные радиоприемные устройства [1, 2]. Дальнейшее улучшение параметров этих систем затруднительно и экономически не всегда обосновано. Развитие компьютерной техники позволяет в настоящее время применять высокопроизводительные компьютеры с большим объемом памяти и, как следствие, значительно расширить возможности радара НР и повысить точность измеряемых параметров ионосферы путем использования эффективных алгоритмов обработки НР сигнала.

Обработка НР сигнала на промежуточной частоте (ПЧ) позволяет использовать алгоритмы, адаптируемые к исследуемому диапазону высот и состоянию ионосферы, а также выполнять как корреляционную, так и спектральную обработку НР сигнала, выявляя и оценивая асимметрию его спектра (в частности, при возмущениях в ионосфере), а также повысить точность измерения параметров НР сигнала (и, соответственно, ионосферы), исключая влияние ряда аппаратных факторов и увеличивая количество дискретных отсчетов обрабатываемого сигнала при его цифровой обработке [3].

Запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется с помощью АЦП по приходу импульсов опроса. Для цифровой обработки сигнала, выделенного радиоприемным устройством на ПЧ, импульсы опроса должны быть жестко привязаны к ПЧ. Также должна быть обеспечена возможность получения квадратурных составляющих корреляционной функции НР сигнала в процессе его цифровой обработки. В связи с этим возникла необходимость в разработке и внедрении устройства

формирования таких импульсов, а также усилительного тракта ПЧ, позволяющего осуществлять частотную фильтрацию сигнала и усиливать его до уровня, достаточного для АЦП.

Целью данной работы является разработка подсистемы, которая позволяет обрабатывать сигналы с использованием записей оцифрованных значений сигнала на промежуточной частоте, и алгоритмов обработки, адаптированных к параметрам НР сигнала, зависящих от состояния ионосферы.

Аппаратурно-методическая реализация измерения параметров НР сигнала на промежуточной частоте. Для получения качественных данных о параметрах ионосферы с помощью радара НР Института ионосферы используется высокочувствительный радиоприемник с тройным преобразованием частоты и выполняется корреляционная обработка сигналов, выделяемых квадратурными каналами радиоприемника с помощью синхронного детектирования и фильтрации сигнала [2].

Структурная схема существующей системы приема и обработки сигнала НР на видеочастоте представлена на рис. 1. В тракте ВЧ осуществляется бланкирование просачивающегося от антенно-фидерного устройства (АФУ) импульса радиопередатчика с целью его подавления во время зондирования. В тракте ПЧ спектр НР сигнала переносится с несущей частоты $f_0 = 158$ МГц на ПЧ $f_{np} = 972,4$ кГц. Каждый из двух квадратурных каналов содержит синхронный детектор с ФНЧ и усилителем и АЦП. Сигналы гетеродинов с частотами f_{r1} , f_{r2} и f_{cr} формируются таким образом, что центральная частота спектра НР сигнала на выходе тракта ПЧ в отсутствие доплеровского сдвига, вызванного движением ионосферной плазмы, (f_{np}) равна частоте синхронного гетеродина f_{cr} . Для формирования квадратурных

сигналов используются сигналы синхронного гетеродина с разностью фаз $\varphi=90^\circ$.

К данной системе предъявляются жесткие требования по обеспечению идентичности параметров

квадратурных каналов, точности и стабильности формирования квадратурных сигналов для измерения скорости движения ионосферной плазмы.

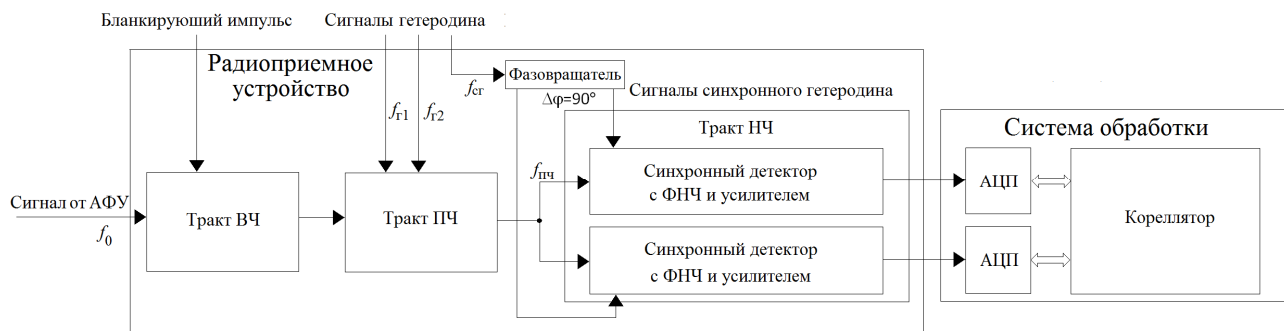


Рис. 1. Структурная схема системы приема и обработки сигнала на видеочастоте

Был предложен новый способ построения приемно-регистрающей системы, которая предусматривает обработку принятого сигнала непосредственно на промежуточной частоте радиоприемного устройства [3, 4]. При этом квадратурные компоненты корреляционной функции (КФ) принятого сигнала определяются исключительно программным способом, что позволяет избежать ошибок, вызванных возможной неидентичностью двух каналов аналогового тракта приемника и двух АЦП системы обработки сигналов. Также исключается необходимость контроля и поддержания разности фаз 90° сигналов синхронного гетеродина, формируемых с помощью аналогового фазовращателя.

Кроме этого, появляется возможность значительно увеличить частоту записи дискретных отсчетов обрабатываемого сигнала для повышения точности измерения параметров НР сигнала. Современные высокопроизводительные ПК позволяют записывать и хранить большой массив отсчетов сигнала на промежуточной частоте, а также использовать цифровую обработку с оптимизированными алгоритмами (специфичными для разных диапазонов высоты и состояния ионосферы [5]).

На рис. 2 представлена структурная схема новой подсистемы приема и обработки сигнала на ПЧ,

которая использует только один быстродействующий АЦП на базе модуля L-card E20-10 (<http://www.lcard.ru/docs/e20-10>).

Подсистема дополняет действующую радиоприемную систему. Она включает в себя блок усиления и фильтрации сигнала ПЧ (состоящий из двух усилителей и полосового фильтра), АЦП, персональный компьютер (ПК) и устройство формирования опросных импульсов. Для жесткой привязки импульсов опроса АЦП к ПЧ в качестве входного сигнала для устройства формирования опросных импульсов используется сигнал синхронного гетеродина с частотой $f_{гг} = f_{гг} = 972,4$ кГц (при этом обеспечивается когерентная работа гетеродинов радиоприемника и сигнала задающей системы для радиопередатчика). На выходе устройства формируются импульсы с частотой следования, равной $4 \cdot f_{гг}$, т.е. с периодом следования, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина. Таким образом, соседние отсчеты сигнала находятся в квадратурной зависимости. Это позволяет определять ординаты квадратурных составляющих КФ $R(\tau)$ с временными сдвигами (аргументами) τ , кратными периоду ПЧ и оптимальными для конкретных условий.

В качестве сигнала обозначения начала каждой радиолокационной развертки используются импульсы запуска передатчика радара НР.

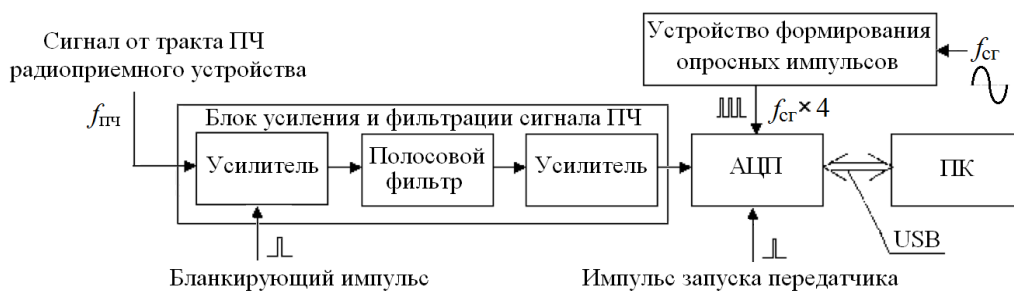


Рис. 2. Структурная схема подсистемы приема и обработки сигнала на промежуточной частоте

Блок усиления и фильтрации сигнала ПЧ. В разработанном и изготовленном нами блоке осуществляется усиление сигнала приемника до уровня, необходимого для нормальной работы АЦП, и его фильтрация. Ширина полосы пропускания тракта ПЧ подсистемы по уровню 0,7 составляет 38 кГц. Ширина пологого участка амплитудно-частотной характеристики равна 18 кГц при ее неравномерности 0,086 дБ. Эти характеристики определяются полосовым фильтром, выполненным на трех связанных LC контурах, и приемлемы для фильтрации без искажения сигнала НР с наиболее широким ожидаемым спектром, характерным для сигнала, рассеянного на высотах внешней ионосферы при наличии в ней легких ионов. Для обеспечения отношения сигнал/шум, близкого к максимально возможному для конкретных высот ионосферы и ее состояния, предназначена дополнительная цифровая квазиоптимальная фильтрация в процессе обработки сигнала в ПК. В первом усилителе предусмотрено бланкирование для дополнительного подавления сигнала передатчика во время зондирования. Второй усилитель, помимо основной функции усиления, осуществляет сопряжение фильтра с входом АЦП. Оба усилителя выполнены на МОП-транзисторах КП307Ж. В качестве бланкирующего элемента в первом усилителе используются ключи на МОП-транзисторах в составе микросхемы К547КП1Б. На выходе второго усилителя используется операционный усилитель на базе микросхемы AD826.

Устройство формирования опросных импульсов АЦП. К формирователю опросных импульсов АЦП предъявляются особые требования к стабильности (температурной и временной) и точности умножения частоты. Это вызвано прецизионностью выборки сигнала для обеспечения квадратурности его отсчетов, используемых для дальнейшего расчета параметров НР сигнала и ионосферы. Для формирования импульсного сигнала с учетверенной ПЧ были проанализированы несколько вариантов умножителей частоты. В частности, были рассмотрены вариант на двух удвоителях частоты и вариант на каскаде с отсечкой тока и выделением 4-й гармоники. Наиболее приемлемым оказался предложенный нами вариант, основанный на выделении 4-й гармоники из последовательности импульсов с оптимальным соотношением периода следования и длительности. Это видно из следующих соображений.

Вариант умножителя частоты с использованием сигнала с отсечкой. Если входной сигнал $u(t) = U_m \cos 2\pi f_{cr} t$ ограничить по уровню $U_{огр}$, амплитуда n -ой гармоники, как известно, равна

$$a_n = U_m \gamma_n(\theta).$$

Здесь U_m – амплитуда входного сигнала, $\gamma_n(\theta)$ – коэффициент Берга для n -ой гармоники:

$$\gamma_1 = \frac{1}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta),$$

$$\gamma_n(\theta) = \frac{2}{\pi} \frac{\sin n \theta \cos \theta - n \cos n \theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)},$$

где θ – угол отсечки, $\theta = \arccos(U_{огр}/U_m)$.

Оптимальным для выделения полезной 4-ой гармоники является угол отсечки $\theta = \pi/2$, но при этом велика составляющая мешающей 2-ой гармоники, для которой это значение θ также оптимально.

Вариант умножителя частоты с импульсным сигналом. Мы предложили вариант умножения частоты, основанный на преобразовании входного гармонического сигнала в серию импульсов с таким же периодом следования $T_{cr} = 1/f_{cr}$ и длительностью τ_n с последующей фильтрацией. При разложении в ряд Фурье такого импульсного сигнала амплитуда n -й гармоники равна

$$a_n = \frac{2A}{\pi n} \sin \left(n\pi \frac{\tau_n}{T_{cr}} \right),$$

где A – амплитуда импульсов. Приравняв $da_n/d\tau_n$ нулю, получим оптимальные значения $\tau/T_{cr} = 1/(2n)$ или $3/(2n)$ для n -й гармоники. Расчеты показали, что для выделения 4-й гармоники, и максимального подавления ближайшей 3-й гармоники наиболее приемлемым является соотношение $\tau/T_{cr} = 0,333$, близкое к $3/(2 \cdot 4)$.

Таблица 1, в которой представлены вычисленные с использованием выше приведенных выражений отношения амплитуд мешающих гармоник к амплитуде 4-й гармоники (a_n/a_4 , до операции фильтрации сигнала), иллюстрирует преимущество предложенного способа.

Таблица 1 – Отношение амплитуд гармоник к амплитуде 4-ой гармоники

| n | Вариант с отсечкой сигнала | Вариант с импульсным сигналом | |
|-----|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | $\theta = \pi/2$ | $\tau/T_{cr} = 0,125$ или $0,375$ | $\tau/T_{cr} = 0,333$ |
| 1 | 11,8 | 1,5 | 4,0 |
| 2 | 5,0 | 1,4 | 2,0 |
| 3 | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | 1,2 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ |

Перед разработкой устройства вариант с импульсным сигналом был апробирован путем моделирования с помощью программы *Multisim*.

На рис. 3 представлена структурная схема разработанного устройства. Эпюры сигналов поясняют его работу.

Буферные усилители, выполненные на полевых транзисторах, обеспечивают развязку радиотехнических цепей. Преобразование сигналов синусоидальной формы в прямоугольную осуществляется с помощью компараторов,

выполненных на базе быстродействующих микросхем Analog Device AD8561.

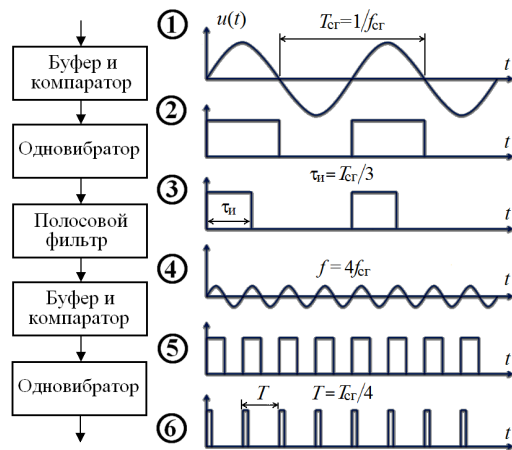


Рис. 3. Структурная схема устройства формирования опросных импульсов АЦП и временные диаграммы напряжений сигналов в его цепях

Для устранения возможных ложных срабатываний компаратора от помехи применена конфигурация схемы с гистерезисом. Первый одновибратор предназначен для формирования импульсов с оптимальной (для выделения полосовым фильтром 4-й гармоники сигнала синхронного гетеродина) длительностью, которая равна 1/3 или 2/3 от периода входного сигнала. Полосовой фильтр, состоящий из двух связанных контуров, подавляет остальные гармоники сигнала, а второй компаратор и одновибратор формируют необходимую форму для опросных импульсов. Оба одновибратора выполнены на микросхеме Philips 74HC4538. Запись информации в АЦП осуществляется по переднему фронту сформированных импульсов опроса. Разрешение на запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара.

На рис. 4 представлена принципиальная схема разработанного и изготовленного устройства формирования опросных импульсов АЦП.

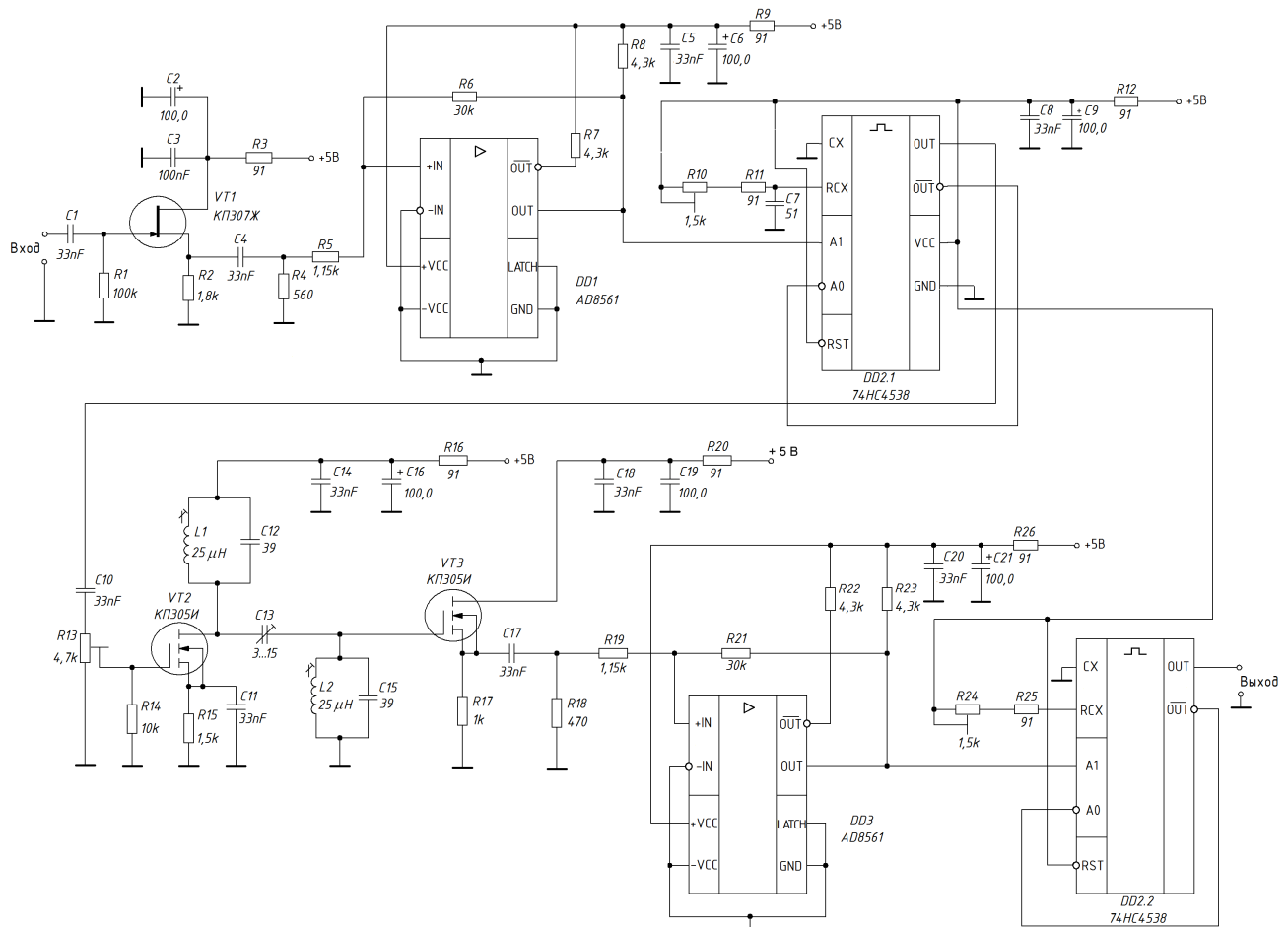


Рис. 4. Принципиальная схема устройства формирования опросных импульсов

Входным сигналом служит гармонический сигнал синхронного гетеродина с напряжением 0,7 В. Изменение напряжения входного сигнала в широких пределах не влияет на работу формирователя

опросных импульсов. На выходе устройства вырабатывается серия импульсов с уровнем ТТЛ логики. С помощью подстроечных резисторов R10 и R24 устанавливается оптимальная длительность

импульсов на выходе первого одновибратора и требуемая скважность сигнала на выходе устройства соответственно.

Осциллограммы сигналов на входе и выходе устройства приведены на рис. 5.

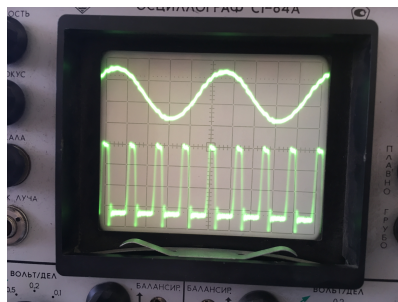
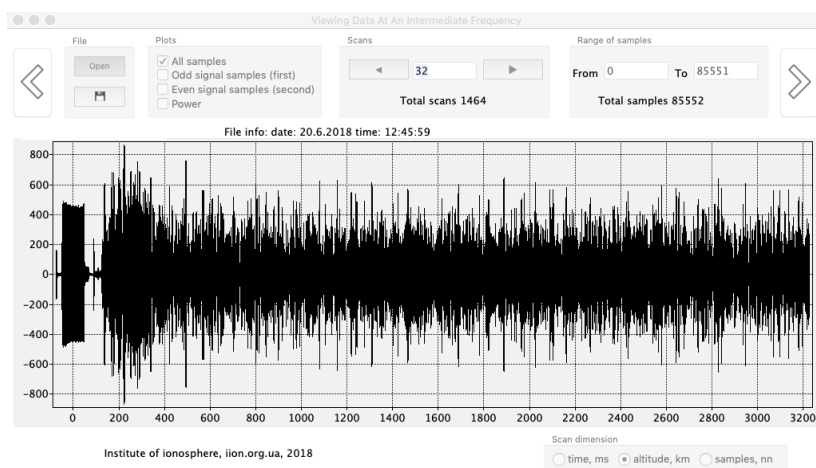


Рис. 5. Входной и выходной сигналы устройства формирования опросных импульсов АЦП на экране осциллографа

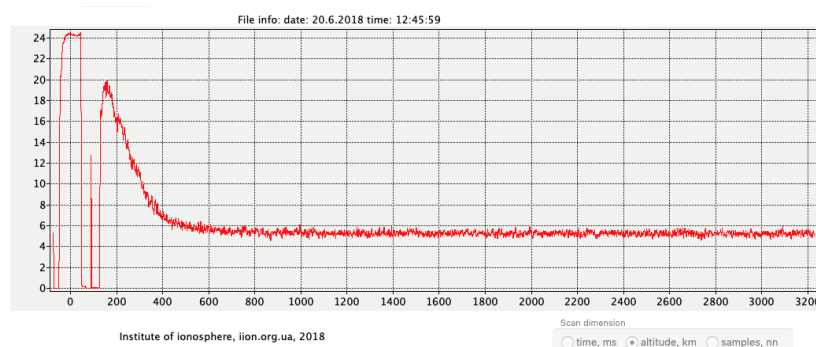
Обработка сигнала на промежуточной частоте. Во время измерения ионосферных параметров осуществляется запись оцифрованных мгновенных значений (дискретных отсчетов)

выходного сигнала приемника и их хранение в двоичных файлах, каждый из которых соответствует, как правило, одноминутному сеансу измерений. В этих файлах содержится также служебная информация [6].

На рис. 6, а приведен пример одной из полученных экспериментально радиолокационных разверток, где показаны измеренные дискретные отсчеты сигнала ПЧ на выходе радиоприемного устройства (в течение каждого сеанса измерений длительностью 1 мин имеется 1464 разверток, а каждая из разверток содержит 85552 отсчета). По оси абсцисс представлены значения высоты в километрах, а по оси ординат – значения напряжения сигнала в условных единицах. Отсчет высоты начинается с середины зондирующего импульса (см. в левой части рисунка, где виден просачивающийся через антенный коммутатор фидерного тракта и бланкирующие элементы приемника импульс передатчика). На участках развертки слева виден НР сигнал на фоне космического и аппаратного шума.



а



б

Рис. 6. Экспериментальные данные, полученные во время измерения ионосферных параметров: преобразованный в цифровой вид и записанный сигнал ПЧ на выходе радиоприемного устройства на протяжении одной радиолокационной развертки (а) и высотный профиль мощности этого сигнала, накопленный в течение сеанса измерений длительностью 1 мин (б)

На рис. 6, б представлена высотная зависимость мощности сигнала (в условных единицах) на выходе радиоприемного устройства, накопленная в течение сеанса измерений в составе радара НР параметров ионосферы.

Обработка принятого сигнала на ПЧ включает в себя такие же стадии, что и обработка сигнала на низкой частоте, описанная в [7, 8]: оценка ординат КФ, просмотр данных и удаление помех, усреднение по времени (обычно 15 мин), исключение шума, учет характеристики восстановления антенного коммутатора, оценка параметров ионосферной плазмы.

Особенности предложенного нами способа корреляционной обработки на ПЧ легко представить с помощью рис. 7, где иллюстрируются КФ НР сигнала на ПЧ при отсутствии доплеровского сдвига спектра (сплошные линии) и при его наличии (пунктир), вызванном общим движением плазмы вдоль луча радара. Точками показаны ординаты КФ, участвующие в корреляционной обработке. $R_o(\tau)$ – огибающая КФ.

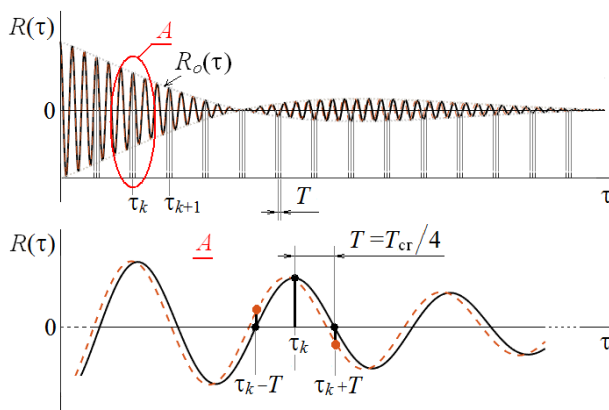


Рис. 7. Корреляционные функции НР сигнала на промежуточной частоте в отсутствие доплеровского сдвига спектра (сплошные линии) и при его наличии (пунктирные линии), вызванном движением плазмы вдоль луча радара

При соблюдении соотношения $T = T_{cr}/4$, ординаты синусной составляющей КФ, соответствующие ординатам измеренной КФ с фиксированным временным сдвигом ($\tau_k - T$) или ($\tau_k + T$), равны нулю в случае отсутствия движения плазмы (доплеровский сдвиг спектра НР сигнала $f_d = 0$) и отличаются от нуля при $f_d \neq 0$, а косинусная составляющая $R(\tau) = R(\tau_k)$ равна огибающей КФ $R_o(\tau_k)$ в первом и близка к ней во втором случае. Использование двух ординат синусной составляющей для каждого k -го аргумента КФ позволяет исключить смещение в определении скорости движения ионосферной плазмы.

Корреляционная обработка сигнала на ПЧ включает в себя следующее.

Оцениваются ординаты косинусной и синусной составляющих КФ принятого сигнала для каждой дискретной радиолокационной задержки t_j , соответствующей высоте $h_j = ct_j/2$ центра

рассеивающего участка ионосферной плазмы протяженностью $\Delta h_j = c\tau_{3и}/2$, для фиксированных временных сдвигов (аргументов КФ) τ_k .

$$R_{\cos(c+m)}(h_j, \tau_k) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k)},$$

$$R_{\sin(c+m)}(h_j, \tau_k + T) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k + T)},$$

$$R_{\sin(c+m)}(h_j, \tau_k - T) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k - T)},$$

где $u(t_j)$ – мгновенные значения сигнала в моменты времени t_j , c – скорость света, $\tau_k = k\Delta\tau$, k – номер ординаты КФ, $k=0, 1, \dots, n$, n – количество используемых для расчета ионосферных параметров ординат КФ, $\Delta\tau$ – шаг сдвига (аргумента КФ), $T = T_{cr}/4$, $\tau_{3и}$ – длительность зондирующего импульса.

КФ НР сигнала определяются в виде разности КФ смеси сигнал+шум на каждом конкретном участке радиолокационной развертки и КФ шума, усредненной на участках развертки, где НР сигнал отсутствует:

$$R_{\cos}(h_j, \tau_k) = R_{\cos(c+m)}(h_j, \tau_k) - \overline{R_{\cos(m)}(\tau_k)},$$

$$R_{\sin}(h_j, \tau_k \pm T) = R_{\sin(c+m)}(h_j, \tau_k \pm T) - \overline{R_{\sin(m)}(\tau_k \pm T)},$$

$$R_{\sin}(h_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{\sin}(h_j, \tau_k - T) - R_{\sin}(h_j, \tau_k + T)].$$

Ординаты огибающей КФ определяются как

$$R_o(h_j, \tau_k) = \sqrt{R_{\cos}^2(h_j, \tau_k) + R_{\sin}^2(h_j, \tau_k)}.$$

Нормированные КФ

$$r_o(h_j, \tau_k) = R_o(h_j, \tau_k) / R_o(h_j, 0)$$

используются для расчета (с использованием метода наименьших квадратов) высотных профилей ионосферных параметров, таких как температуры ионов и электронов, ионный состав, а также нормированного профиля концентрации электронов. Высотный профиль концентрации электронов рассчитывается с привлечением критической частоты слоя ионосферы F2, которая измеряется ионозондом.

Скорость движения ионосферной плазмы определяется в соответствии с выражением

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\tau_k} \left[\arctg \frac{R_{\sin}(h_j, \tau_k)}{R_{\cos}(h_j, \tau_k)} \right].$$

Новое программное обеспечение позволяет оперативно устанавливать шаг сдвига $\Delta\tau$ и количество используемых для дальнейшей обработки ординат КФ. С уменьшением $\Delta\tau$ повышается точность определения параметров ионосферы. В принципе, минимальный сдвиг $\Delta\tau$ может быть равным периоду T следования импульсов опроса АЦП или периоду T_{cr}

колебаний сигнала синхронного гетеродина (периоду ПЧ). Однако с практической точки зрения (объем накапливаемой информации и возможность обработки в реальном времени в процессе измерений) такой необходимости нет. Как показывают расчеты, при использовании зондирующего радиоимпульсного сигнала с несущей частотой $f_0=158$ МГц и длительностью $\tau_{\text{зи}}=650$ мкс наиболее приемлемые значения Δt для снижения статистической и систематической погрешности определения ионосферных параметров находятся в пределах $4T_{\text{ст}} < \Delta t < 36T_{\text{ст}}$. Причем, выбор Δt зависит от параметров ионосферы (температур ионов и электронов, ионного состава) для разных высот и ее состояния (см., например, рис. 8).

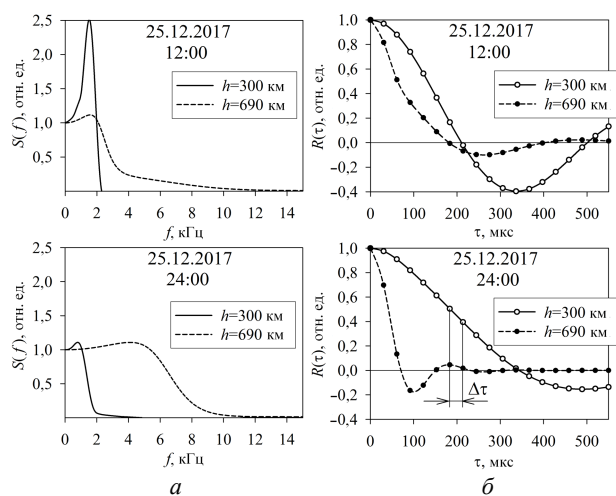


Рис. 8. Пример полуспектров (а) и соответствующих им корреляционных функций (б) НР сигнала для высот вблизи максимума ионизации (сплошная линия) и внешней ионосферы (пунктир), измеренных днем (верхняя панель) и ночью (нижняя панель) с помощью радара НР Института ионосферы в условиях низкой активности Солнца, характеризующихся наибольшими изменениями ионосферных параметров по высоте

Таким образом, если использовать 18–20 ординат КФ на интервале корреляции (второй ноль КФ), что достаточно для определения параметров ионосферы, оптимальным является шаг от $\Delta t=5$ –10 мкс для высот внешней ионосферы, где преобладают ионы водорода, и $\Delta t=30$ –40 мкс для высот вблизи максимума ионизации, где в основном присутствуют ионы O^+ .

Экспериментальные результаты при обработке сигнала на промежуточной частоте. После разработки, изготовления и настройки подсистема приема, записи и обработки сигнала на ПЧ была внедрена в состав радиоприемного устройства радара НР, проведены эксперименты. На рис. 9–11 представлены данные измерений, полученные 20 июня 2018 г. при 15-минутном накоплении (12:30–12:45 местного времени).

Измеренная нормированная КФ НР сигнала, рассеянного на высоте 280 км, приведена на рис. 9.

В расчете данной КФ использованы все отсчеты сигнала и минимально возможный шаг сдвига (аргумента) КФ $\Delta t=T_{\text{ст}}/4=0,257$ мкс. При этом рассчитанная величина вертикальной составляющей скорости движения плазмы $V_z=-62$ м/с.

На рис. 10 представлены измеренные квадратурные составляющие КФ НР сигнала, для трех высот ионосферы. Из рисунка видно, что интервал корреляции уменьшается с увеличением высоты. Для низких и средних высот количество ординат КФ достаточно для дальнейших вычислений, и выбор такого шага Δt оправдан. Для верхней ионосферы число ординат КФ может быть недостаточным для определения параметров ионосферы с приемлемой точностью (особенно для ночного времени, когда интервал корреляции может быть чрезвычайно коротким).

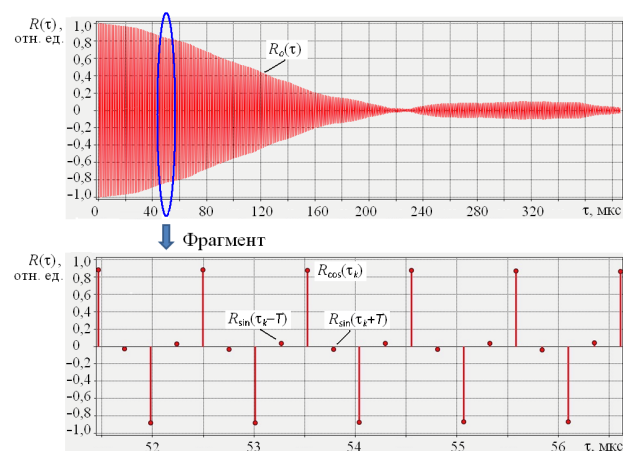


Рис. 9. КФ НР сигнала с высоты 280 км (шаг $\Delta t=T_{\text{ст}}/4=0,257$ мкс)

Отношение мощности рассеянного на больших высотах сигнала к мощности шума (q) с увеличением высоты уменьшается, и вызванный этим рост статистической погрешности может быть в какой-то степени компенсирован уменьшением шага Δt и, следовательно, увеличением количеством ординат КФ, имеющих физический смысл и участвующих в обработке.

Для иллюстрации выше сказанного на рис. 11 приведено сравнение результатов корреляционной обработки с использованием адаптивного режима более короткого шага сдвига КФ (в данном случае $\Delta t=40 \cdot T_1=10,284$ мкс) и режима со стандартным (до настоящего времени) шагом $\Delta t=T_2 \approx 30$ мкс. T_1 и T_2 – интервалы дискретизации сигнала.

Из рис. 11 видно, что при использовании адаптивного режима ($\Delta t \approx 10,3$ мкс) КФ сигнала, рассеянного в верхней ионосфере, можно определять более точно даже для дневного времени.

Еще одним преимуществом является то, что бесполезные для обработки ординаты в хвосте КФ (в данном случае показанные на затемненном участке рис. 1, а для $\tau > 300$ мкс), не используются в

дальнейших расчетах параметров ионосферы, тем самым не вносятся дополнительные погрешности, вызванная статистическим разбросом значений этих ординат, экономится память ПК и сокращается время обработки.

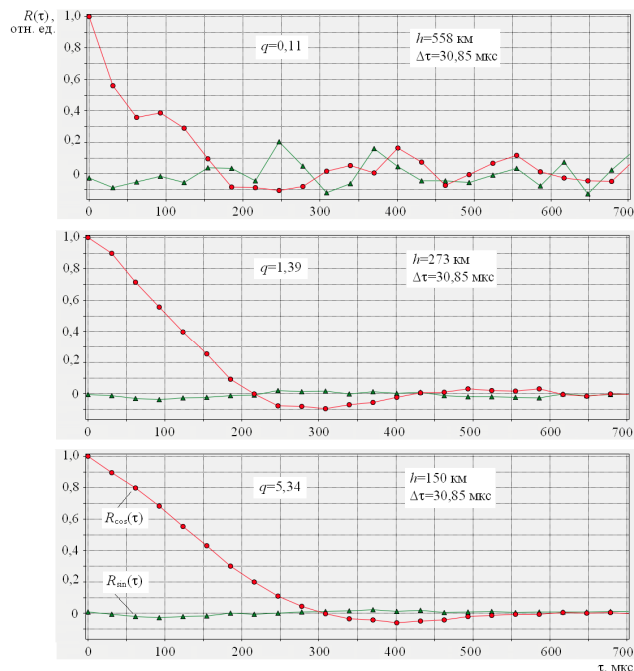


Рис. 10. Оценки косинусных и синусных составляющих корреляционной функции НР сигнала для трех высот: 150, 273 и 558 км (шаг $\Delta\tau=120 \cdot T \approx 30,85$ мкс, q – отношение сигнал/шум).

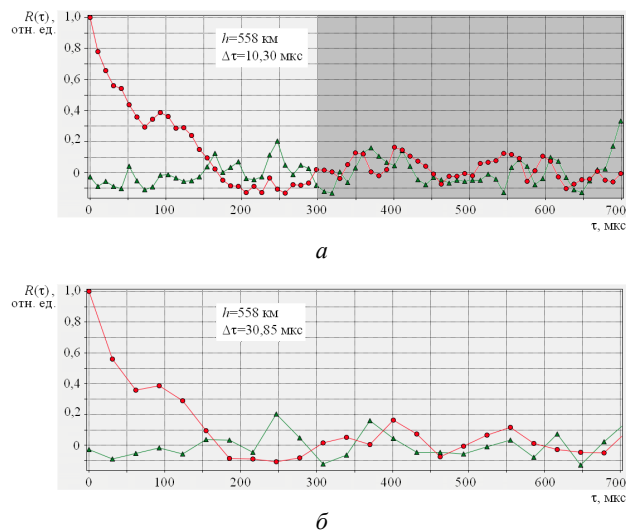


Рис. 11. Сравнение результатов корреляционной обработки с использованием адаптивного (а) и действующего (б) режимов

Расчеты показали, что среднеквадратическое отклонение КФ при сравнении ее с модельной КФ уменьшилось приблизительно в 2 раза при использовании шага $\Delta\tau=40 \cdot T \approx 10,3$ мкс вместо

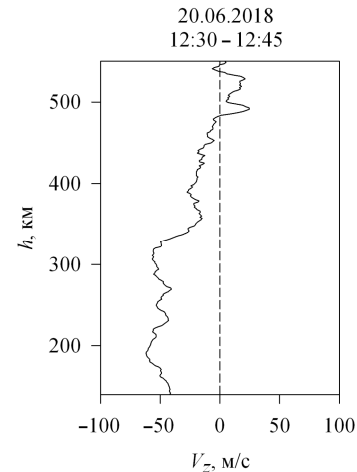


Рис. 12. Высотный профиль вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы

$\Delta\tau = 80 \cdot T \approx 20,6$ мкс и в 2,5 раза – вместо $\Delta\tau = 120 \cdot T \approx 30,9$ мкс.

На рис. 12 в качестве примера показан один из высотных профилей вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы, полученный с помощью корреляционной обработки сигнала на ПЧ при временном накоплении 15 мин.

Выводы. Разработана и внедрена подсистема приема, записи на промежуточной частоте и обработки сигнала, которая реализует предложенный способ корреляционной обработки НР сигнала и позволяет избавиться от недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки. Новый способ и реализующая его подсистема дают следующие преимущества:

- Исключение аналоговых цепей для формирования квадратурных сигналов позволяет избежать возможного влияния ряда аппаратных факторов на точность определения квадратурных составляющих корреляционной функции НР сигнала.
- Адаптация шага временного сдвига и количества ординат измеряемой корреляционной функции к НР сигналу при разном состоянии ионосферы, в том числе к НР сигналу, принимаемому с различных высотных участков.
- Возможность увеличения количества отсчетов сигнала на радиолокационной развертке дальности с целью уменьшения статистической погрешности оценки корреляционной функции НР сигнала и, следовательно, параметров ионосферы.
- Возможность использования дополнительно к корреляционному анализу спектральной обработки НР сигнала для детального анализа эффектов в ионосфере, особенно в ее возмущенном состоянии.
- Запись большого количества отсчетов сигнала с малыми (около 0,26 мкс) интервалами между ними позволяет апробировать и использовать в любое время самые различные алгоритмы обработки, наиболее приемлемые для конкретных условий измерений.

• Обработка сигнала на промежуточной частоте приемника дает возможность осуществлять эффективный контроль зондирующих импульсов (распределение амплитуд и фаз на их протяжении) во время проведения измерений, а также учет их характеристик при определении параметров ионосферы.

• Появляется возможность исключения помех на ранней стадии обработки, анализируя непосредственно отсчеты сигнала для каждой радиолокационной развертки, а не вычисленные статистические параметры сигнала при накоплении по всем разверткам в течение сеанса измерений.

Список литературы

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // *Proceedings of the IEEE*. – V. 57, N 4. – 1969. – P. 496–530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
2. Domnin I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere*. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – N 47 (1089). – P. 28–42.
3. Емельянов Л. Я. Особенности обработки сигналов некогерентного рассеяния на радаре Института ионосферы / Л. Я. Емельянов, А. И. Лялюк, Е. В. Рогожкин // *Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. сб.* – 2015. – Вып. 182. – С. 29–33.
4. Emelyanov L. Features of signals reception and processing at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar / L. Emelyanov, A. Miroshnikov, I. Domnin, E. Rogozhkin // 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 10–14 Sept. 2018, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, – 2018.
5. Емельянов Л. Я. Квазиоптимальный прием сигналов некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, И. М. Касымов // *Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015, № 37 (1146). – С. 79–86.
6. Мирошников А. Е. Формат данных системы обработки сигналов на промежуточной частоте радара НР / А. Е. Мирошников // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Радіофізика та іоносфера.* – 2017. – № 47 (1268). – С. 57–60.
7. Domnin I. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse / I. F. Domnin, L. Ya Emelyanov, L. F. Chernogor // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2012, vol. 3, N 4. – P. 311–324. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.50.
8. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)

11–15 Sept. 2017, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, – 2017, – P. 531–535. DOI: 10.1109/UkrMico.2017.8095425.

References (transliterated)

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no 4, 1969, pp. 496–530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
2. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
3. Emel'yanov L. Ya., Lyalyuk A. I., Rogozhkin E. V. Osobennosti obrabotki signalov nekogerentnogo rasseyaniya na radare Instituta ionosfery [Features of signal processing of incoherent scattering on the radar of the Institute of the Ionosphere] *Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* [Radio Engineering: All-Ukrainian. Intermediate Scientific-tech. Bull.], 2015, vol. 182, pp. 29–33.
4. Emelyanov L., Miroshnikov A., Domnin I., Rogozhkin E. Features of signals reception and processing at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar. 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 17–20 Sept. 2018, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, – 2018.
5. Emel'yanov L. Ya., Bogomaz A. V., Kasymov I. M. Kvaziopitmal'nyy priem signalov nekogerentnogo rasseyaniya [Quasiopitmal' reception of the incoherent scatter signals]. *Visn. Nats. tekhn. in-tu «Kharkivs'kiy politekhnichniy institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 37 (1146), pp. 79–86.
6. Miroshnikov A. E. Format dannykh sistemy obrabotki signalov na promezhutochnoy chastote radara NR [The data format of the signal processing system at the intermediate frequency of the HP radar]. *Visn. Nats. tekhn. in-tu «Kharkivs'kiy politekhnichniy institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2017, no. 47 (1268), pp. 57–60.
7. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012, vol. 3, no. 4, pp. 311–324. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.50.
8. Bogomaz O., Kotov D., Panasenko S., Emelyanov L. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data. 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 11–15 Sept. 2017, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, 2017, pp. 531–535. DOI: 10.1109/UkrMico.2017.8095425.

Поступила (received) 31.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ємельянов Леонід Якович (Емельянов Леонид Яковлевич, Emelyanov Leonid Yakovlevich) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, завідувач відділу; м. Харків; Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2117-2675>; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Мірошников Артем Євгенович (Мирошников Артем Евгеньевич, Miroshnikov Artem Yevgenyovych) – Інститут іоносфери НАН і МОН України, м.н.с.; м. Харків, Україна; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Колодяжний В'ячеслав Валерійович (Колодяжний Вячеслав Валерьевич, Kolodiazhnyi Viacheslav Valeriyovych) – Інститут іоносфери НАН і МОН України, інженер-електронік 1 категорії; м. Харків; Україна; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.